원전의 항공기 충돌 리스크 평가를 위한 대표매개변수 선정 연구

신 상 섭¹ · 함 대 기^{1*} · 최 인 길¹

¹한국원자력연구원 중합안전평가부

A Study on the Determination of Reference Parameter for Aircraft Impact Induced Risk Assessment of Nuclear Power Plant

Sang Shup Shin¹, Daegi Hahm^{1*} and In-Kil Choi¹

¹Integrated Risk Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

Abstract

In this study, we developed a methodology to determine the reference parameter for an aircraft impact induced risk assessment of nuclear power plant (NPP) using finite element impact analysis of containment building. The target structure used to develop the method of reference parameter selection is one of the typical Korean PWR type containment buildings. We composed a three-dimensional finite element model of the containment building. The concrete damaged plasticity model was used for the concrete material model. The steels in the tendon, rebar, and liner were modeled using the piecewise-linear stress-strain curves. To evaluate the correlations between structural response and each candidate parameter, we developed Riera's aircraft impact force-time history function with respect to the variation of the loading parameters, i.e., impact velocity and mass of the remaining fuel. For each force-time history, the type of aircraft is assumed to be a Boeing 767 model. The variation ranges of the impact velocity and remaining fuel percentage are 50 to 200m/s, and 30 to 90%, respectively. Four parameters, i.e., kinetic energy, total impulse, maximum impulse, and maximum force are proposed for candidates of the reference parameter. The wellness of the correlation between the reference parameter and structural responses was formulated using the coefficient of determination (R^2). From the results, we found that the maximum force showed the highest R^2 value in most responses in the materials. The simplicity and intuitiveness of the maximum force parameter are also remarkable compared to the other candidate parameters. Therefore, it can be concluded that the maximum force is the most proper candidate for the reference parameter to assess the aircraft impact induced risk of NPPs.

Keywords : aircraft impact, nuclear power plant, risk assessment, finite element analysis, force-time history method

1. 서 론

2001년 항공기 충돌에 의해 발생한 미국의 9.11 사고, 2011년 동일본 대지진에 의해 발생한 일본의 후쿠시마 원전 사고 이후, 구조물에 대해 심각한 손상 및 붕괴를 유발하는 항공기 충돌, 쓰나미, 초대형 지진 등 비정상 극한 하중에 대한 안전성 평가 연구가 원자력 발전소 구조물에 대해서도 활발히 진행되고 있다. 특히, 대규모 인위적 재해에 해당하는 항공기 충돌은 구조물에 직접적으로 막대한 타격을 입힘으로써 안전

성에 심각한 위협을 초래할 수 있기 때문에 최근에는 원자력 발전소와 같이 높은 안전성이 요구되는 시설물에 대하여 항공기 충돌에 대한 안전성의 검증을 요구하고 있는 추세이다(NEI 07-13 Rev. 8, 2011; 10CFR50.150, 2009).

항공기 충돌에 대한 구조물의 안전성 평가를 위한 연구는 Riera(1968)가 항공기 충돌에 대한 원자력 발전소 격납건물의 응력 응답해석 연구를 시작한 이후, 이론적 방법, 실험적 방법, 유한요소 모델링을 통한 기하학적 해석방법 등을 통해 점차적으로 발전되어 왔다. 항공기 충돌 사건 발생시, 원자력

* Corresponding author:

Tel: +82-42-868-2276; E-mail: dhahm@kaeri.re.kr

Received July 2 2014; Revised August 14 2014

Accepted August 18 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발전소 격납건물 벽체의 파손을 확률적으로 평가하기 위한 연구(Chelapati *et al.*, 1972), 항공기(Boeing 707-320)의 하중합수를 이용하여 격납건물의 동적 응답을 해석하기 위한 연구(Rebora *et al.*, 1976), 항공기 충돌 벽체의 유연성 영향(effect of target flexibility)과 충돌 각도(oblique) 영향을 평가하기 위한 연구(Riera 1980), 그리고 파손 변형률(cracking strain)과 항공기/전투기의 충돌 위치에 따른 격납건물 응답 해석을 위한 연구(Abbas *et al.*, 1996) 등이 이론적 방법으로 주로 연구되어 왔다. 실험적 연구로는 Sandia National Laboratories에서 수행된, 항공기 충돌 하중합수의 검증에 위한 F-4D 전투기의 콘크리트 벽체 충돌 시험 등을 대표적으로 꼽을 수 있다(Sugano *et al.* 1993).

이후, 2001년 미국의 WTC 사고가 발생하였으며, 항공기 충돌에 대한 세계적인 관심이 급격히 증가하여 원자력 발전소와 같은 중요 사회기반 시설물에 대하여 대형 항공기 충돌 안전성을 평가하기 위한 연구가 최근의 주요 연구 주제로 주목을 받아 왔다. 또한 대규모 유한요소 충돌 해석을 위한 고성능의 하드웨어와 우수한 충돌 해석 시뮬레이션 코드들이 개발되면서 최근 수년간 항공기 충돌 관련 연구는 유한요소로 모델링된 대형 민간 항공기를 이용하여 다양한 구조물에서의 충돌 안전성을 평가하기 위한 연구들이 주를 이루었다. Katayama 등(2004)은 철근 콘크리트 벽체에 대한 항공기 충돌 안전성을 평가하였으며, Arros 등(2007)은 Boeing 747-400을 대상으로 가상의 원자력 발전소에 대한 충돌 안전성을 평가하였다. Lo Frano 등(2009)은 원자력 발전소 격납건물에 대한 Boeing 747-400의 충돌해석을 통해 구조물의 전반적 거동을 평가하였으며, Mullapudi 등(2012)은 가상의 SC 벽체에 대한 항공기 충돌해석 연구를 수행한 바 있다. Iqbal 등(2012)과 Sadique 등(2013)에 의해 항공기 충돌 하중합수를 적용한 원자력 발전소 격납건물의 응답 평가 연구가 수행되기도 하였다. 한편, 국내에서도 원자력 발전소 관련 항공기 충돌 연구로서, 항공기 충돌 하중을 받는 CANDU형 원전 격납구조물의 비선형 동적 해석(Jung, 2002) 연구를 시작으로, 대형 민항기 충돌에 대한 국내 원전 격납건물의 비선형 동적 응답 연구(Jeon *et al.*, 2005), 항공기 충돌에 대한 가상의 SC(Steel-Plate Concrete) 격납건물 전반 거동 평가 연구(Shin *et al.*, 2011), 병렬프로세서를 이용한 항공기 충돌해석(Song *et al.*, 2011) 등이 수행되어 왔다. 이와 같이 현재까지의 원자력 발전소에 대한 항공기 충돌 연구는 특정 기종의 항공기가 충돌할 경우에 대하여, 격납건물과 보조건물 벽체에 발생 가능한 관입, 관통 등의 국부손상 및 대상 구조물의 전반손상에 대한 영향 평가를 위한 연구가 주를 이루었다. 또한 이들 연구는 대부분 결

정론적인 관점에서 벽체 및 구조물의 항공기 충돌에 대한 안전성 확보 여부를 확인하고 검증하는 데에 목적을 두고 있었다. 그러나 최근의 IAEA 보고서 등을 통한 항공기 충돌 안전성 평가 연구 동향에 의하면, 이러한 결정론적 방법에 의한 연구 외에도 확률론적 관점으로 대형 민항기 충돌에 대한 원자력 발전소 시스템의 리스크를 평가하여 일정 수준 이상의 안전성을 확보토록 하기 위한 연구가 도입되려 하는 시점에 있음을 알 수 있다(IAEA EBP WA7, 2013; IAEA, 2013). 따라서 향후의 원전 항공기 충돌 안전성 평가 연구는 충돌로 인한 구조물의 국부적 손상 여부의 평가 이외에도, 충돌에 의해 발생하는 진동으로 인한 발전소 내부 기기의 손상 등을 확률론적으로 평가하여, 항공기 충돌에 대한 취약도 함수를 각 주요 기기 별로 도출하고, 발전소 시스템의 안전성을 리스크 측면에서 평가하기 위한 연구가 진행될 것이라 판단된다.

현재까지 원자력 발전소에 작용하는 외부하중에 대한 리스크 평가 연구 중에는 확률론적 지진 리스크 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA) 분야의 연구가 가장 활발하게 연구되어온 분야라 할 수 있다. SPRA 방법론의 경우, 지진규모, 진앙거리, 지진원, 지반 종류 등 지진 하중의 다양한 불확실성 인자들을 최대지반운동가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)라는 하나의 대표 매개변수로 표현하여, 이에 대한 지진 취약도 함수를 도출하고 원자력 발전소의 리스크를 평가하고 있다. 이는 지진규모, PGA, PGD(Peak Ground Displacement), PGV(Peak Ground Velocity) 등 다양한 매개변수 후보군들 중 PGA가 구조물 응답과의 상관성이 가장 높을 뿐만 아니라 하중이 가지는 리스크를 직관적으로 표현할 수 있는 매개변수이기 때문이다. 따라서 항공기 충돌에 대한 원자력 발전소의 리스크 평가를 위해서도 지진 리스크 평가에서의 최대지반운동가속도(PGA)와 같이 직관적이면서도 구조물의 응답과 높은 상관성을 가지는 대표 매개변수의 도출이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 원전의 항공기 충돌 리스크 평가를 위한 대표 매개변수 선정 방법론을 도출하고, 이를 적용하여 가장 직관적이며 구조물 응답과의 상관성이 가장 높은 대표 매개변수를 선정하였다. 항공기 충돌 하중의 불확실성 인자로는 항공기의 충돌 초기속도, 질량(연료량 및 승객 수), 항공기 기종, 항공기 충돌 각도, 항공기 충돌 위치, 항공기의 재료적 불확실성 등을 들 수 있다. 이들 중 항공기 충돌로 인한 구조물의 응답에 가장 큰 영향을 미치는 불확실성 인자는 항공기의 충돌 속도와 항공기의 질량이라고 할 수 있다. 그러나 이 두 변수는 항공기의 응답에 각각 독립적으로 영향을 미치기 때문에 어느 하나를 대표 매개변수로 선정하는 것은 불합리하며, 이러한 변수들의 영향을 동시에 표현할 수 있는 대

표 매개변수의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 항공기 충돌 하중의 불확실성 인자를 동시에 반영할 수 있는 4개의 대표 매개변수 후보군을 도출하였다. 국내의 대표적인 PWR(Pressurized Water Reactor)형 원전 격납건물 중 하나를 충돌 대상 구조물로 선정하였으며, 해당 격납건물에 대한 실제 충돌 해석을 통해 각각의 매개변수들에 따른 격납건물의 구조적 응답을 평가하였다. 질량, 속도 등의 매개변수 변화에 따라 다수의 해석 케이스를 수행하여야 하기 때문에, 상대적으로 간략한 해석 방법인 충돌 하중함수를 이용한 해석 기법을 적용하였다. 후보군으로 선정된 각 매개변수와 응답과의 상관성을 통계학적으로 분석함으로써 가장 상관성이 높으면서도 직관적인 대표 매개변수를 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이로써 지진 리스크 평가에서의 최대지반 운동가속도(PGA)와 같이 원자력 발전소의 항공기 충돌 리스크 평가를 위한 대표 매개변수를 합리적으로 도출할 수 있다. 대표 매개변수는 향후 항공기 충돌에 대한 원자력 발전소 주요 구조물 및 기기의 취약도 평가에 이용될 수 있으며, 최종적으로 원전의 항공기 충돌 리스크를 평가하기 위한 매개변수로 사용될 것이다.

2. 대상 구조물 및 재료 모델링

2.1 대상 구조물 모델링

본 연구에서 사용된 PWR형 격납건물의 형상 및 유한요소 모델(Finite Element Model)은 Fig. 1과 같다. 격납건물의 기초 상단으로부터 스프링라인(Spring line)까지 높이는

44.81m, 격납건물 내부반경은 23.01m, 벽체 두께는 1.21m이다(Fig. 1(a)). 간략화된 수치해석을 위해 격납건물의 장비 반입구 등은 고려하지 않았으며, Fig. 1(a)의 기초 하단부에서 전 방향 및 회전을 구속하도록 경계조건을 정의하였다. 격납건물 주변을 둘러싸고 있는 보조건물 등의 높이를 고려하여 항공기 충돌 위치를 스프링라인으로부터 11.32m 아래(Fig. 1(b))로 선정하였다. 항공기 충돌 시, 격납건물 응답은 Fig. 1(b)의 Point A에서 평가하였다.

격납건물을 실제와 유사하게 모델링하기 위해, 실 구조물의 벽체 하단과 기초 접합부 간 부분한지 연결부의 다웰바와 텐던 등이 극한 외부 하중에 충분히 저항할 수 있다고 가정하였다. 따라서, 이에 대한 추가적인 고려 없이 벽체와 기초를 Fig. 1(b)와 같이 모델링하였다. 그리고 격납건물에서 가장 큰 부분을 차지하는 콘크리트를 입체요소로 구성하였으며, 철근, 프리스트레싱 텐던을 Fig. 2와 같이 이상화시켜

Fig. 2 Idealization & Modeling of Concrete, Tendon and Reinforcements

(a) Geometry of Containment Building

(b) Finite Element Model & Aircraft Impact Location

Fig. 1 Finite Element Modeling of PWR Type Containment Building

Fig. 3 Modeled Shape of Prestressing Tendons

모델링하였다. 구형 돔 및 기초 슬래브 위치의 텐던 배치 형상은 실제와 유사하게 모델링하였다(Fig. 3). 격납건물 내의 철근은 철근 배근의 복잡성과 높은 철근비(약 1% 이상)를 고려하여, 콘크리트 요소의 두께 방향으로 내·외부 철근이 위치하는 지점에 각각의 면 요소를 생성한 후, 철근 층 옵션(Rebar Layer Option)을 사용하여 각 위치의 철근 간격, 단면적, 그리고 배근 방향을 설정하는 분산모델 개념을 도입하여 모델링하였다.

2.2 재료 모델링

2.2.1 콘크리트 재료 모델

본 연구에서 사용된 콘크리트 구성모델은 ABAQUS 6.11에서 제공하는 손상소성모델(Damaged Plasticity Model,

SIMULIA, 2008)을 사용하여 정의하였다. 이 모델은 연속체, 소성기반 콘크리트의 손상을 묘사하기 위한 모델로서 동적 하중을 받는 콘크리트 구조물의 해석이 가능하다. 콘크리트의 주요 파괴 현상은 인장균열과 압축파괴로 인해 발생하는 것으로 가정되어 있다. 이 모델에서는 단축의 인장 및 압축 응답이 콘크리트의 손상소성(Damaged Plasticity) 특성에 의해 Fig. 4와 같은 거동을 보이는 것으로 가정한다. Fig. 4(a)에서 단축 인장 상태의 콘크리트 응력-변형률 거동은 인장 파괴응력 (σ_{t0})에 이를 때까지 선형탄성(Linear Elastic) 관계를 따른다. 그리고 Fig. 4(b)에서 단축 압축 상태에서 콘크리트의 응력-변형률 거동은 초기 항복응력 (σ_{c0})에 이를 때까지 선형탄성 관계를 따른다.

인장 상태에서 콘크리트의 파괴 응력은 미소균열(micro-cracking)이 발생하는 시점에 따르며, 파괴 응력 이후 미소균열은 연화된(softening) 응력-변형률 관계를 따라 전개되면서 콘크리트의 국부변형률 증가(strain localization)를 유발하게 된다. 압축 상태에서는 항복 응력(σ_{c0}) 도달 이후 소성 상태에서 극한 응력(σ_{cu})에 이를 때까지 응력 경화(hardening)와 변형률 연화(softening) 현상을 겪게 된다. 콘크리트 재료는 응력-변형률 곡선의 변형률 연화(strain softening) 구간에서 하중이 제거(unloading)될 경우 응답 약화(weakened)

Table 1 Material Properties of Concrete

Young's Modulus (kg/cm ²)	Poisson's Ratio			Density (kg/cm ³)
3.10E5	0.17			2.40E-6
f_{cu} (kg/cm ²)	f_{ct} (kg/cm ²)			-
425.0	42.0			-
Plasticity Parameters				
Dilation Angle	Eccentricity	f_{b0}/f_{c0}	K	Viscosity Parameter
38	0	0	0	0

(a) Tensile Behavior

(b) Compression Behavior

Fig 4 Concrete Stress-Strain Relationship under Uniaxial Loading

현상이 발생한다(Fig. 4). 즉, 손상된 탄성 강도(Elastic Stiffness, E_0)를 따라 거동하게 된다. 본 연구에서 사용된 콘크리트 재료 물성은 Table 1과 같다.

2.2.2 강재 재료 모델

철근은 콘크리트와 달리 재료의 특성을 정의함에 있어서 일축응력 상태에 놓인 단일 응력-변형률 관계로써 규정할 수 있으며, 압축영역과 인장영역에서 동일한 응력-변형률 곡선을 갖는 재료로 모사할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계산상의 편의를 위해 길이방향으로 작용하는 축력에 저항하도록 일차원 응력-변형률 관계로 구성하였다. 그리고 응력변화에 따른 재료성질의 변화는 수치적인 안정성과 계산상의 이점 등을 고려하여 선형탄성, 선형변형경화 형태를 갖는 탄·소성 재료로 모델링하였다. 분산균열모델에서 콘크리트의 균열은 국부적으로 집중되지 않고, 콘크리트요소 내의 적분영역에 고르게 분포된 변형률로 이상화된다. 콘크리트의 균열이 고르게 분포된 변형률로 모사될 경우 변형률 적합조건에 의거하여 해당 영역에서 매입철근(Embedded Steel Bar)의 변형률 또한 고르게 분포하는 것으로 가정된다. 그러나 실제 매설철근의 변형률 분포는 균열부에서 크고, 균열 사이에서는 콘크리트가 인장증강효과로 인해 어느 정도 응력을 부담하게 되므로 균열부에서의 변형률 보다 작은 값을 갖는다. 이러한 특성을 지닌 보강 철근의 응력-변형률 관계는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서 사용된 철근의 각 변수값을 Table 2에 정리하였다.

Fig. 5 Stress-Strain Relationship of Rebar

Table 2 Material Properties of Rebar

Young's Modulus (kg/cm ²)	Poisson's Ratio	Density (kg/cm ³)	Yield Stress (kg/cm ²)
2.04E6	0.30	7.85E-6	4218.0

일반 철근과 달리 텐던의 응력-변형률 관계는 뚜렷한 항복 응력을 나타내지 않는 특징이 있다. 이런 경우, 곡선은 주요점을 기준으로 구간별 선형(piecewise linear)으로 모델링하는

것이 바람직하다. 이때 비례탄성한계(Proportional Elastic Limit), 항복점(Yield Point), 파괴점(Failure Point) 등 재료의 특성을 나타내는 점을, 구간을 나누는 주요 점에 포함시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 텐던의 응력-변형률 곡선을 Fig. 6와 같이 정의하였으며, 사용된 각 변수들은 Table 3에 정리된 것과 같다.

Fig. 6 Stress-Strain Relationship of Tendon

Table 3 Material Properties of Tendons

Young's Modulus (kg/cm ²)	Poisson's Ratio	Density (kg/cm ³)	Yield Stress (kg/cm ²)
1.97E6	0.30	7.85E-6	16874.0

3. 하중함수 모델링

대형 민항기 충돌해석 방법은 실험에 의한 방법, 수치해석에 의한 방법 등이 있다. 이 중 실험에 근거한 결과가 가장 정확한 결과가 될 수 있으나 지금까지는 보안상의 이유로 대형 민항기를 이용한 직접 충돌 실험 결과가 공개되지 않고 있다. 따라서 현재까지 대부분의 항공기 충돌 연구는 하중-시간이력 기법(Force-Time History Method)과 충돌체-구조물 상호작용 기법(Missile-Target Interaction Method)을 적용하여 수행되고 있다(NEI 07-13 Rev. 8, 2011). 본 연구에서는 Riera(1968)의 방법론에 기초한 하중-시간이력 기법(Force-Time History Method)을 적용하였으며, 여기에 가정된 사항은 다음과 같다: 1) 충돌대상 구조체는 강체이다; 2) 항공기의 축/길이 방향은 충돌 방향에 수직이다; 3) 항공기는 속도(v)를 가지는 부분과 속도(0)인 부분으로 나뉜다; 4) 모든 찌그러짐은 강체인 충돌체와 인접한 곳에서 발생한다; 5) 항공기 재료는 강성체의 완전 소성거동을 따른다. Riera(1968)가 운동량 보존법칙에 기반하여 제시한 항공기충돌 하중함수 식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$F(t) = P_c(x) + \mu(x)(dx/dt)^2 \quad (1)$$

여기서, $P_c(x)$ 는 항공기 동체의 강성, $\mu(x)$ 는 항공기의 질량, dx/dt 는 항공기의 초기충돌속도이다.

식 (1)은 Sandia National Laboratories에서 이루어진 Phantom 4D 전투기를 이용한 충돌 실험(Sugano *et al.*, 1993)에 의해 제시된 강도감소계수 $\alpha_c=0.9$ 을 포함하는 식 (2)로 수정되어 현재 사용되고 있으며, 본 연구에서도 식 (2)를 기반으로 하여 항공기충돌 하중함수를 도출하였다.

$$F(t) = P_c(x) + \alpha_c \mu(x)(dx/dt)^2 \quad (2)$$

하중함수 도출에 필요한 항공기 질량 함수($\mu(x)$)를 정의하기 위해서는 항공기 중량의 약 35%를 차지하는(Table 4 참조) 연료(항공유)의 동체 내 분포에 대한 가정이 필요하다. 실제 항공기 내 항공유는 Fig. 7(a)와 같이 분포되어 있으나, 본 연구에서는 다양한 항공기 충돌 속도와 연료량을 고려해야 하므로 이를 간략화하여, Fig. 7(b)와 같이 중앙연료탱크와 2번, 3번 탱크에 모든 항공유가 분포하는 것으로 가정하였다. 또한 항공기 연료탱크의 연료는 모두 시간당 동일한 비율로 감소하는 것으로 가정하였다.

다양한 항공기 충돌 속도를 고려하기 위해, 항공기의 착륙시 최저 속도, 최대 속도 등을 고려하여 항공기 충돌속도의 고려 범위는 50~200m/s로 하였으며, 속도 변동폭 단위는 25m/s로 하였다. 항공기 질량은 항공유 잔량에 따라 변화하

Table 4 Weight Properties of Boeing 767
(www.boeing.com)

Characteristics	GE Engines(Kg)
Max. Design Taxi Weight	204,570
Max. Design Takeoff Weight	204,116
Max. Design Zero Fuel Weight	149,685
Usable Fuel	73,363

(a) Actual Distribution

(b) Idealized Distribution

Fig. 7 Fuel Distribution of Boeing 767 (www.brandweerschiph.nl)

게 되는데, 본 연구에서는 운항 중 소모되는 연료량 등을 고려하여 최대 연료 적재량 대비 잔존 항공유 비율을 30~90%로 가정하였으며, 연료 변동폭 단위는 10%로 하였다.

초기 충돌속도 변화에 따라 도출된 하중이력 곡선은 Fig. 8에 나타난 것과 같으며, 질량(연료량) 변화에 따라 작성된 하중이력 곡선은 Fig. 9와 같다. Fig. 8과 Fig. 9의 가로축은 항공기 충돌 시간을 나타내며, 세로축은 정규화된 하중값을 의미한다. Fig. 8에서 연료량 90%의 경우, 초기 충돌속도가 200m/s인 경우에 비하여 50m/s인 경우에는 최대하중값이 약 90% 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9

Fig. 8 Aircraft Impact Force-Time History Curve with respect to the Variation of Initial Impact Velocity

Fig. 9 Aircraft Impact Force-Time History Curve with respect to the Variation of Remained Fuel Percentage

Fig. 10 Shape of Aircraft Impacted Surface

에서 초기 충돌속도 200m/s의 경우, 연료량이 90%인 경우에 비해 30%인 경우의 최대하중값이 약 36% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 하중이력 곡선과 최대하중값은 항공기의 질량(연료량) 보다는 초기 충돌속도에 더 지배적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

다양한 질량-속도 조합의 경우에 대하여 가장 대표적인 항공기 충돌 매개변수를 도출하기 위해서는 각 질량-속도 조합에 대한 충돌 수치해석이 먼저 수행되어야 한다. 수치해석은 하중이력 곡선을 압력-시간이력으로 등가 치환하여 수행되었다. 항공기 하중 재하 면적은 Riera(2003)가 사용한 방법과 유사하게 Fig. 10과 같이 작용하는 것으로 가정하였다. 하중이력곡선 적용 방법은 날개 부위가 벽체에 충돌하기 전까지는 동체에 해당하는 면적에만 압력을 재하하고, 이후 날개 부위의 충돌이 발생하기 시작하여 종료되는 시점까지는 항공기 동체와 날개에 해당하는 면적에 동시에 압력을 재하 한다. 이후로부터 해석 종료 시점까지는 동체에만 압력을 재하하게 된다.

4. 항공기 충돌 해석

4.1 Force-Time History방법 해석 결과

초기 충돌속도와 연료량 변화에 대한 격납건물의 변형 형상 및 응력 응답은 Fig. 11~14에 나타난 것과 같다. 연료

량이 60%인 경우에 대하여, 초기 충돌속도가 각각 50, 125, 200m/s일 때의 격납건물 콘크리트 변형 형상 및 충돌 방향 응력분포를 각각 Fig. 11(a)~(c)에 나타내었다. 연료량 60%, 초기 충돌속도 50m/s인 경우, 격납건물 최대 변위 응답은 약 0.03m였으나, 초기 충돌속도가 200m/s로 증가할 경우, 최대 변위 응답은 약 0.60m로서 충돌속도 50m/s인 경우에 비하여 약 20배 가량 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 때 콘크리트에 발생하는 최대 응력은 0.93MPa에서 6.96MPa로 약 7.5배 증가함을 알 수 있다. 콘크리트 최대 응력은 격납건물의 벽체 하단과 기초접합 부분에서 주로 발생하며, 충돌이 발생하는 격납건물 벽체 위치와 반대편 벽체의 콘크리트 응력 분포는 유사하게 나타난다. 동일한 연료량 및 충돌 속도의 경우에 격납건물 내부 텐던의 변형 및 von Mises 응력분포를 Fig. 12에 나타내었다. 텐던의 경우, 건설 시 도입된 초기 긴장력으로 인해 von Mises 응력이 텐던 전반에 걸쳐 발생하는 것을 볼 수 있으며, 하중 재하 위치의 von Mises 응답이 전체 응답에 비해 상대적으로 적게 발생하는데, 이는 충돌 위치에서 텐던의 초기 긴장력 손실이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

항공기 초기 충돌속도가 150m/s인 경우, 연료량 30, 60, 90%에 대한 격납건물 콘크리트의 변형 형상과 최대 응력 응답은 각각 Fig. 13(a)~(c)에 나타난 것과 같다. 초기 충돌속도 150m/s, 연료량 30%인 경우, 격납건물 최대 변위 응답은 약 0.11m, 충돌방향의 콘크리트 최대 응력은 2.5MPa로 평가되었으며, 동일한 초기 충돌속도 하에서 연료량이 90%로 증가하였을 때에는 격납건물 최대 변위 응답이 약 0.2m, 충돌방향의 콘크리트 최대 응력이 3.6MPa 발생하여, 각각 약 1.8배 및 1.4배 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 질량 변화에 따른 응답 변동성은 초기 충돌속도 변화에 따른 응답 변동성보다 작음을 알 수 있다. 초기 충돌

Fig. 11 Deformed Shape & Maximum Concrete Stress Response (Fuel 60%, ×20 Scale)

Fig. 12 Deformed Shape & von Mises Stress Response of Tendon (Fuel 60%, ×20 Scale)

Fig. 13 Deformed Shape & Maximum Concrete Stress Response (Initial Impact Velocity 150m/s, ×20 Scale)

Fig. 14 Deformed Shape & von Mises Stress Response of Tendon (Initial Impact Velocity 150m/s, ×20 Scale)

속도 150m/s인 경우에 대하여, 연료량 30%, 60%, 90%에 대한 격납건물 내부 텐던 변형 형상 및 von Mises 응답 분포를 각각 Fig. 14(a)~(c)에 나타내었다. 연료량 변화에 따른 텐던 응답 변화는 Fig. 12에 나타난 결과와 유사하게 하중 재하 위치의 von Mises 응답이 전체 응답에 비해 상대적으로 작게 발생하는 것을 볼 수 있다.

4.2 속도, 질량 민감도 해석

Riera(1968)의 항공기 충돌하중 함수식에 따르면 속도의 제곱항 및 질량분포가 하중함수에 지배적인 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 이 두 변수 중 하나로서 대표매개변수를 선정하고, 이에 대한 취약도 평가 및 리스크 평가를 수행하는 것이 합리적인가를 분석하기 위하여, 초기 충돌속도 및 연료량 변화에 대한 콘크리트, 철근, 텐던의 최대 변형률

응답 경향을 Fig. 15에 나타내었다. 변형률 응답에 초점을 맞춘 것은 격납건물의 극한 상태라고 할 수 있는 관통 균열이 발생하게 되는 시점이 구조 부재의 변형률 응답에 의하여 결정되기 때문이다.

연료량 30% 및 60%의 경우, 연료량 90%인 경우에 비해 상대적으로 속도에 따른 변형률 응답 증가량이 적은 것을 Fig. 15(a)~(c)에서 확인할 수 있다. 그러나 이 때에도 초기 충돌속도가 150m/s보다 커지게 되면 연료량에 따른 응답 차이가 현저하게 발생하기 시작하는 것을 볼 수 있다. Fig. 15(d)~(f)에서는 초기 충돌속도 100m/s, 150m/s의 경우, 연료량에 의한 변형률 응답 차이가 초기 충돌속도 200m/s의 경우보다 매우 작게 나타났다. 초기 충돌속도가 200m/s인 경우, 연료량 60% 이상의 구간에서 응답이 급격하게 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과를 통하여 볼 때, 항공기의 초기 충돌속도가

(a) Concrete, Velocity Variation

(d) Concrete, Fuel Variation

(b) Rebar, Velocity Variation

(e) Rebar, Fuel Variation

(c) Tendon, Velocity Variation

(f) Tendon, Fuel Variation

Fig. 15 Maximum Strain Response of Each Structural Element with respect to the Variation of Initial Impact Velocity and Remained Fuel Percentage

항공기의 잔존 연료량보다 구조물의 응답에 지배적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 하지만 동일한 초기 충돌속도 하에서도 항공기의 연료량 변화, 즉 질량 변화에 따라 응답의 차이가 분명히 존재하며 이러한 경향은 초기 충돌 속도가 증가할수록 더 확연하게 발생함을 알 수 있었다. 따라서 원자력 발전소에 대한 항공기 충돌 리스크 평가를 위한 대표 매개변수로서 초기 충돌속도나 항공기 질량 중 하나의 변수를 선정하는 것은 합리적인 선택이 될 수 없음을 알 수 있다. 이는 두 변수가 서로 독립적으로 응답에 영향을 미침으로 인해 각각이 항공기 충돌의 대표성을 지니는 매개변수라 할 수 없기 때문이다. 따라서 이런 독립적인 변수들의 영향을 동시에 고려할 수 있는 통합적인 대표 매개변수의 선정이 필요하다.

5. 대표 매개변수 도출

5.1 주요 매개변수 정의

원자력 발전소의 항공기 충돌에 대한 취약도 함수 도출 및 리스크 평가를 위해서는 항공기 충돌에 영향을 미치는 다양한 불확실성 인자(항공기 초기 충돌속도, 질량, 기종, 충돌 각도, 충돌 위치, 항공기 재료적 불확실성)들에 대해 단일화된 대표 매개변수가 필요하다. 단일화된 대표 매개변수는 SPRA분야에서 사용되고 있는 최대지반운동가속도(PGA)와 같이, 구조물 응답과 높은 상관성을 지니며, 하중이 가해질 경우의 리스크를 직관적으로 표현할 수 있는 특성을 가지는 것이 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 항공기 충돌 하중의 불확실성 인자를 동시에 반영할 수 있는 4개의 대표 매개변수 후보군을 선정하였다. 이는 하중함수의 최대 하중(Max. Force), 충격량(Impulse), 최대 충격량(Max. Impulse), 그리고 운동에너지(Kinetic Energy) 등으로서, 모두 항공기 충돌의 대표 불확실성 인자인 초기 충돌속도와 질량 함수를 대표할 수 있는 매개변수들이다.

각각의 매개변수가 가지는 물리적 의미는 Fig. 16에 제시

Fig. 16 Physical Meaning of Maximum Force, Impulse and Maximum Impulse

된 바와 같다. 최대 하중은 항공기의 구조적 특성에 의해 동체와 날개부분이 동시에 충돌할 때 발생한다. 최대 하중 산출 시 하중의 지속시간은 고려되지 않는다. 충격량 매개변수는 식 (3)과 같이 정의되며, 하중시간이력 곡선을 지속시간에 따라 적분한 값이라 할 수 있다.

$$\text{Impulse} = \int_0^t F(t) \cdot dt \quad (3)$$

최대 충격량은 최대 하중값과 최대 하중의 지속시간을 동시에 고려한 값으로서, 하중시간이력 곡선에서 최대 하중이 지속되는 구간을 적분한 값이라 할 수 있다. 수치적으로는 충격량-시간이력 곡선에서 최대 기울기가 발생하는 구간의 적분값으로서 다음의 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Max. Impulse} = \int_{t_1}^{t_2} \text{Max. } F(t) \cdot dt \quad (4)$$

마지막으로, 속도 함수의 제곱항과 질량 함수의 곱으로서 표현되는 운동에너지는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\text{Kinetic E.} = \int_0^t \frac{1}{2} mv^2(t) dt \quad (5)$$

5.2 대표 매개변수 도출

매개변수 선정에 가장 중요한 항목은 지진리스크 평가에서의 최대지반운동가속도(PGA)와 같이 높은 직관성을 가지면서도 구조물 응답과의 높은 상관성을 가지는 매개변수가 되어야 한다는 점이다. 각각의 매개변수 정의로부터 각 변수가 가지는 직관성을 분석하면, 최대 하중 > 충격량 > 최대 충격량 > 운동에너지 순이라 평가할 수 있다. 정의된 매개변수 후보군과 응답의 상관성 순위를 평가하기 위해서는 대표 매개변수 후보군과 응답 간의 관계에 대한 통계학적 분석이 필요하다. 본 연구에서는 상관성 분석을 위해 대표 매개변수 후보군과 각 구조재료의 변형률 응답 간 상관관계를 분석하였으며, 각 구조재료의 변형률 응답에 대한 회귀분석(Regression Analysis)을 통해 결정계수(R^2)를 도출하였다. 각 대표매개변수 후보군과 주요 구조부재 변형률 응답 간의 상관성을 그래프로 나타내면 Fig. 17~19와 같다. 각 그래프에서 세로축은 각 재료의 최대 변형률 응답을 로그스케일로 표시한 것이며, 가로축은 각 변수들의 값을 동일한 기준에서 비교하기 위하여 최대값을 기준으로 정규화하여 나타낸 결과이다. Fig. 17은 각 변수들과 콘크리트 최대 변형률 응답과의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 콘크리트 응답에서는 운동에너지, 충격량, 그리고 최대 하중의 경우 변수의 증가에 따라 응답이 증가하는 경향을 나타내며 높

Fig. 17 The Concrete Response for the Variations

Fig. 18 The Rebar Response for the Variations

은 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 최대 충격량 응답은 다른 경우에 비해 다소 불규칙적인 경향을 보이며, 일부 구간에서는 심지어 단조 증가의 경향을 나타내지 않는 것을 볼 수 있다. 각 변수들과 철근의 최대 변형률 응답 간 상관관계를 Fig. 18에 나타내었다. 철근의 변형률 응답 또한 콘크리트의

경우와 유사하게 최대 충격량을 제외한 나머지 변수들에서 높은 상관성이 나타남을 알 수 있다. 각 변수들과 텐던의 최대 변형률 응답 간 상관관계는 Fig. 19에 나타난 것과 같다. 텐던 변형률 응답 경향도 콘크리트, 철근의 경우와 유사하여, 최대 충격량을 제외한 나머지 변수들에서 높은 상관성이 나타나는

Fig. 19 The Tendon Response for the Variations

것을 알 수 있다.

이상의 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 각각의 경우에 대한 R^2 값을 도출하고 이를 정리하여 Table 5에 나타내었다. 대표매개변수를 선정하기 위해 사용된 결정계수(R^2)는 통계학적 변량의 하나로서, 두 변수 사이의 상관관계, 즉 구조 재료의 응답과 선정된 매개변수 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수(R)를 제곱한 값이다. 결정계수(R^2)는 표본관측으로 추정된 회귀선이 실제 관측치를 어느 정도 대표하는가에 대한 적합성을 측정하는 계수로서 0과 1사이의 값을 지닌다. 결정계수(R^2)가 1일 경우, 모든 표본 관측치가 추정된 회귀선 상에 놓여있다는 것을 의미하며, 이 때에는 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 완전히 설명할 수 있다. 하지만, 결정계수(R^2)가 0일 경우, 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 전혀 설명하지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 결정계수(R^2)가 1에 가까울수록 두 변수의 상관성이 높다는 것을 의미한다. Table 5의 결과를 통하여 볼 때, 각 대표매개변수 후보군과 변형률 응답 간의 상관성 순위는 다음과 같이 평가된다.

- 콘크리트 변형률 응답: 충격량 > 운동에너지 > 최대 하중 > 최대 충격량
- 철근 변형률 응답: 최대 하중 > 운동에너지 > 충격량 > 최대 충격량
- 텐던 변형률 응답: 최대 하중 > 충격량 > 운동에너지 > 최대 충격량

Table 5 R^2 Estimation Results

Parameters	Concrete	Rebar	Tendon
Kinetic E.	0.9300	0.9372	0.9111
Impulse	0.9387	0.9188	0.9269
Max. Impulse	0.8540	0.7501	0.7763
Max. Force	0.9234	0.9394	0.9436

최대 충격량을 제외하고는 모든 매개변수에 대하여 각 경우의 결정계수(R^2) 값의 편차가 크지 않음을 볼 때, 최대 하중, 충격량, 운동에너지는 모두 응답과의 높은 상관성을 보이는 매개변수라 할 수 있다. 이 중 항공기 충돌 하중의 최대값은 항공기의 종류, 질량, 속도 등으로부터 비교적 간단하게 도출될 수 있으므로, 대표매개변수로서 합리적인 선택이 될 수 있으며, 이를 매개변수로 하여 취약도와 리스크를 평가하게 될 경우, 발주자 또는 사용자가 직관적으로 하중 규모가 가지는 리스크를 인지하고 판단하게 될 것으로 기대할 수 있다.

6. 결 론

항공기 충돌에 의한 원전 및 설비의 안전성을 정량적으로 평가하기 위한 취약도 해석(Fragility Analysis) 및 리스크 평가(Risk Assessment)의 사전 연구로서, 항공기 충돌 매개변수 선정에 관한 방법론을 도출하고, 대표적 국내 가압형 경수로 원전 격납건물 모델을 대상으로 제안된 방법론을 적용하여 항공기 충돌 리스크 평가를 위한 대표 매개변수를 선

정하였다. 대상 격납건물에 대한 Boeing 767 항공기 충돌 발생 상황을 가정하여 다양한 초기 충돌속도와 연료량 변화에 따른 하중시간이력 곡선을 작성하였으며, 수치해석을 통해 구조물의 응답을 평가하였다. 초기 충돌속도와 질량(연료량)에 대한 구조물의 응답을 분석한 결과, 각각의 변수가 상호 독립적으로 응답에 영향을 미치므로 둘 중의 한 변수를 대표매개변수로 선정하는 것은 불합리함을 알 수 있었다. 따라서, 원전의 지진 리스크 평가에서 사용되는 최대지반운동 가속도(PGA)와 같이 직관성이 뛰어나고 응답과의 상관관계가 높을 것으로 예측되는 네 개의 대표매개변수 후보군을 도출하였다. 매개변수 후보는 각각 운동에너지, 충격량, 최대 충격량, 최대 하중 등이다. 각 대표매개변수 후보에 대하여 회귀분석 및 통계학적 분석을 통해 응답의 상관성을 평가하였다. 주요 구조부재 응답과의 상관성 순위를 결정계수(R^2)를 이용하여 분석한 결과, 최대 하중 값이 전반적으로 가장 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 선정된 각각의 매개변수들 중에서 최대 충격량을 제외한 나머지 변수들은 구조물 응답 편차가 상대적으로 적게 나타나, 응답과의 상관성이 높은 매개변수임을 알 수 있었다. 특히 최대 하중값은 분석된 격납건물 구성 구조재료 중 철근과 텐던의 변형률 응답에서 가장 높은 상관성을 보였을 뿐만 아니라, 하중시간이력 곡선에서 가장 직관적으로 판단하기 쉬운 매개변수이므로 항공기충돌 리스크 평가를 위하여 가장 적합한 매개변수로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력기술개발사업, No. 2012M2A8A4009710).

Reference

- Abbas, H., Paul, D.K., Godbole, P.N., Nayak, G.C. (1996) Aircraft Crash upon Outer Containment of Nuclear Power Plant, *Nucl. Eng. & Design*, 160, pp.13~50.
- Arros, J., Doumbalski, N. (2007) Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures, *Nucl. Eng. & Design*, 237, pp.1241~1249.
- Boeing 767 Family (2011) Airport Reference Code and Approach Speeds for Boeing Airplanes.
- Chung, C.H. (2002) Dynamic Non-linear Analysis of the CANDU-6 Containment Subjected to Aircraft Impact Forces, *KSCE*, 22(4A), pp.965~974.
- Chelapati, C.V., Kennedy, R.P., Wall, I.B. (1972) Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Structures, *Nucl. Eng. & Design*, 19(2), pp.333~364.
- Henkel, F.O., Klein, D. (2007) Variants of Analysis of the Load Case Airplane Crash, Transactions, *19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMIRT19)*, Toronto, America.
- Iliev, V., Georgiev, K., Serbezov, V. (2011) Assessment of Impact Load Curve of Boeing 747-400, <http://www.Nts-bg.ttm.bg>.
- Iqbal, M.A., Rai, S., Sadique, M.R., Bhargave, P. (2012) Numerical Simulation of Aircraft Crash on Nuclear Containment Structure, *Nucl. Eng. & Design*, 243, pp.321~335.
- IAEA EBP WA7 (2013) Safety Aspects in Protection of NPP against Human Induced External Events: General Considerations, IAEA Safety Report(Draft).
- IAEA (2013) Safety Assessment of NPP Structures against Human Induced External Events, IAEA Safety Report(Draft).
- Jeon, S.J., Lee, Y.S., Chung, C.H., Chung, Y.S. (2005) Dynamic Nonlinear Response of Domestic Nuclear Containment Buildings Subjected to Large Aircraft Impact Load, *KSCE*, 25(1A), pp.191~200.
- Katayama, M., Itoh, M., Rainsberger, R. (2004) Numerical Simulation of Jumbo Jet Impacting on Thick Concrete Walls - Effects of Reinforcement and Wall Thickness, *2nd Asian Conference on High Pressure Research(ACHPR-2)*, Nara, Japan.
- Lo Frano, R., Forasassi, G. (2009) Preliminary Evaluation of Aircraft Impact on a Near Term Nuclear Power Plant, *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe*, Bled, Slovenia, pp.602.1~602.9.
- Mullapudi, T.R.S., Summers, P., Moon, I.H. (2012) Impact Analysis of Steel Plated Concrete Wall, Structures Congress, ASCE, pp.1881~1893.
- Nuclear Energy Institute (NEI 07-13) (2011) Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs.
- Riera, J.D. (1968) On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Forces, *Nucl. Eng. & Design*, 8, pp.415~426.
- Rebora, B., Zimmermann, Th. (1976) Dynamic Rupture Analysis of Reinforced Concrete Shells,

- Nucl. Eng. & Design*, 37, pp.269~297.
- Riera, J.D.** (1980) A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety against Accidental Aircraft Impact, *Nucl. Eng. & Design*, 57, pp.193~206.
- Riera, J.D., Rios, R., Iturrioz, I.** (2003) Determination of the Load-carrying Capacity of a Reinforced Concrete Shell Subjected to Impact Loading, *Transactions, 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT17)*, Prague, Czech Republic, pp.1~8.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Orui, S., Von Riesemann, W.A., Bickel, D.C., Parks, M.B.** (1993) Full-scale Aircraft Impact Test for Evaluation of Impact Force, *Nucl. Eng. & Design*, 140, pp.373~385.
- SIMULIA, ABAQUS/Standard 6.8-1 - User's Manual** (2008) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., RI, USA.
- Shin, S.S., Park, T.H.** (2011) Analysis of Containment Building Subjected to a Large Aircraft Impact using a Hydrocode, *KSCE*, 31(5A), pp.369~378.
- Song, Y.S., Shin, S.S., Jung, D.H., Park, T.H.** (2011) Numerical Analysis of Nuclear-Power Plant Subjected to an Aircraft Impact using Parallel Processor, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.715~722.
- Sadique, M.R., Iqbal, M.A., Bhargave, P.** (2013) Nuclear Containment Structure Subjected to Commercial and Fighter Aircraft Crash, *Nucl. Eng. & Design*, 260, pp.30~46.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC)** (2009) Aircraft Impact Assessment, 10CFR50.150.

요 지

원전의 항공기 충돌 리스크 평가에 사용되는 대표매개변수를 선정하기 위한 방법론을 개발하였다. 대상 원전은 국내의 대표적인 경수로형 원전 중 하나로 선정하여 3차원 유한요소 해석 모델을 구축하였다. 콘크리트 재료모델에는 소성손상모델이 적용되었으며, 강재는 다중선형곡선거동을 가지는 것으로 모델링하였다. 운동에너지, 전체 충격량, 최대 충격량, 최대 하중 등 4종의 대표매개변수 후보군을 선정하였다. 각각의 매개변수 후보군은 모두 충돌 속도와 질량의 함수로 표현되므로, 충돌 속도 50~200m/s, 항공유량 30~90%의 범위에 대하여 매개변수값을 도출하고 충돌 해석을 수행하여, 충돌 시의 구조 응답과의 상관관계를 분석하였다. 모든 해석에서 항공기의 기종은 보잉767 기종으로 선정하였다. 충돌해석에는 Riera의 하중-시간 이력 함수를 이용한 해석기법을 적용하였다. 매개변수와 충돌 시 응답의 상관관계 적합성은 결정계수값을 이용하여 분석하였다. 4 종의 대표매개변수 후보군 중 최대 하중값이 가장 직관적일 뿐만 아니라 본 연구에서의 해석 케이스에서는 응답과의 상관성도 가장 뛰어난 것으로 나타남에 따라, 항공기충돌 리스크 평가를 위하여 가장 적합한 매개변수라 할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 항공기 충돌, 원자력발전소, 리스크 평가, 유한요소 해석, 하중-시간이력법